REGIONE PIEMONTE

La prevenzione del rischio sismico in Piemonte

Pinerolo, 22 marzo 2013

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI TORINO

La caratterizzazione del sottosuolo

le indicazioni delle NTC e la buona pratica esecutiva

POLITECNICO DI TORINO

Prof. Ing. Sebastiano Foti

Email: sebastiano.foti@polito.it
www.soilmech.polito.it/people/foti_sebastiano

Sommario

- Valutazione dell'azione sismica:
  - pericolosità sismica nazionale
  - risposta sismica locale
  - Categorie di sottosuolo
  - Prove sismiche
    - CHT – DHT
    - Onde superficiali (SASW, MASW, ReMi, Passive arrays, …)

- Idoneità del sito di costruzione
  - Stabilità dei pendii
  - Interferenza con rotture di faglia in superficie
  - Liquefazione

Pericolosità sismica italiana INGV → NTC 2008

CAMBIO DI PARADIGMA

Definizione dei valori di pericolosità su maglia geografica (0.05°)

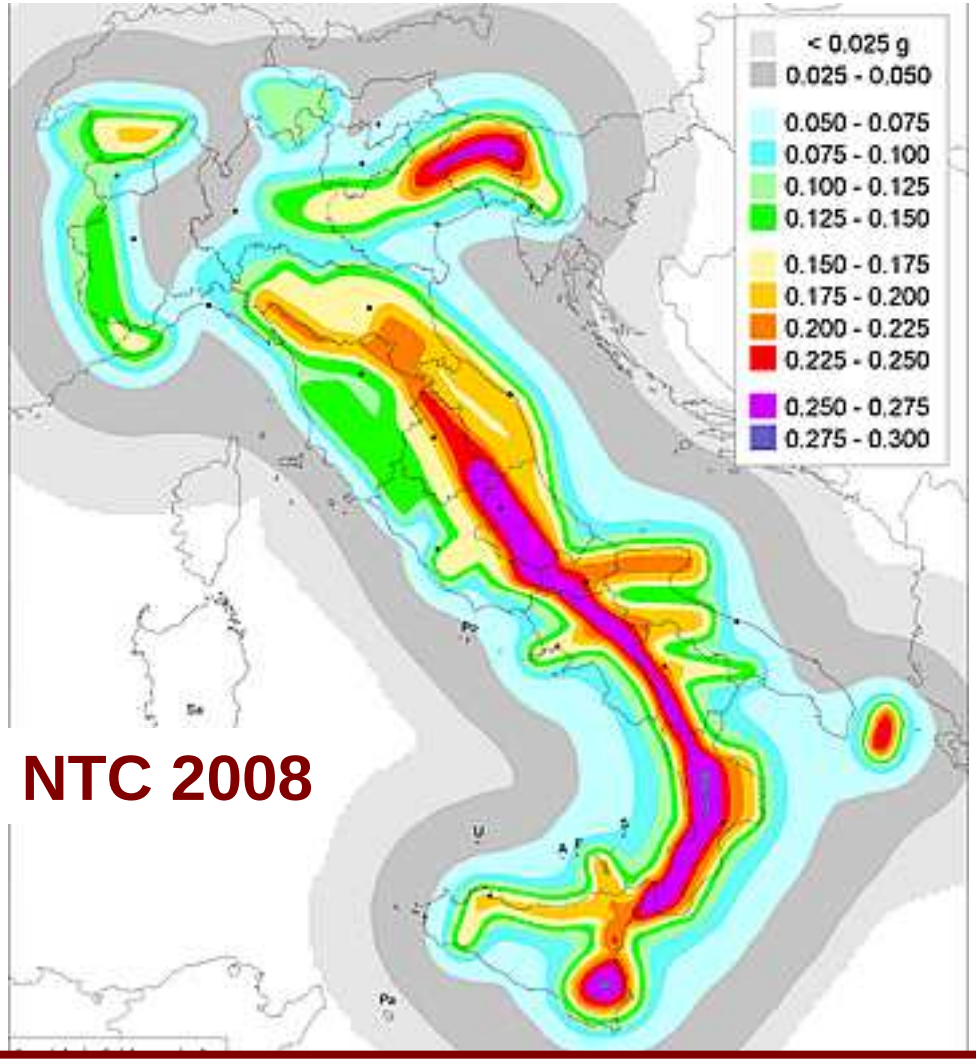
La pericolosità è definita in funzione del periodo di ritorno

Assegnati un periodo di riferimento e una probabilità di superamento si ottiene l'azione di progetto

Stati Limite		P_{V_R}
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Esempio: a_g
probabilità superamento 10% in 50 anni
(SLV strutture ordinarie)
→ T_R=475 anni

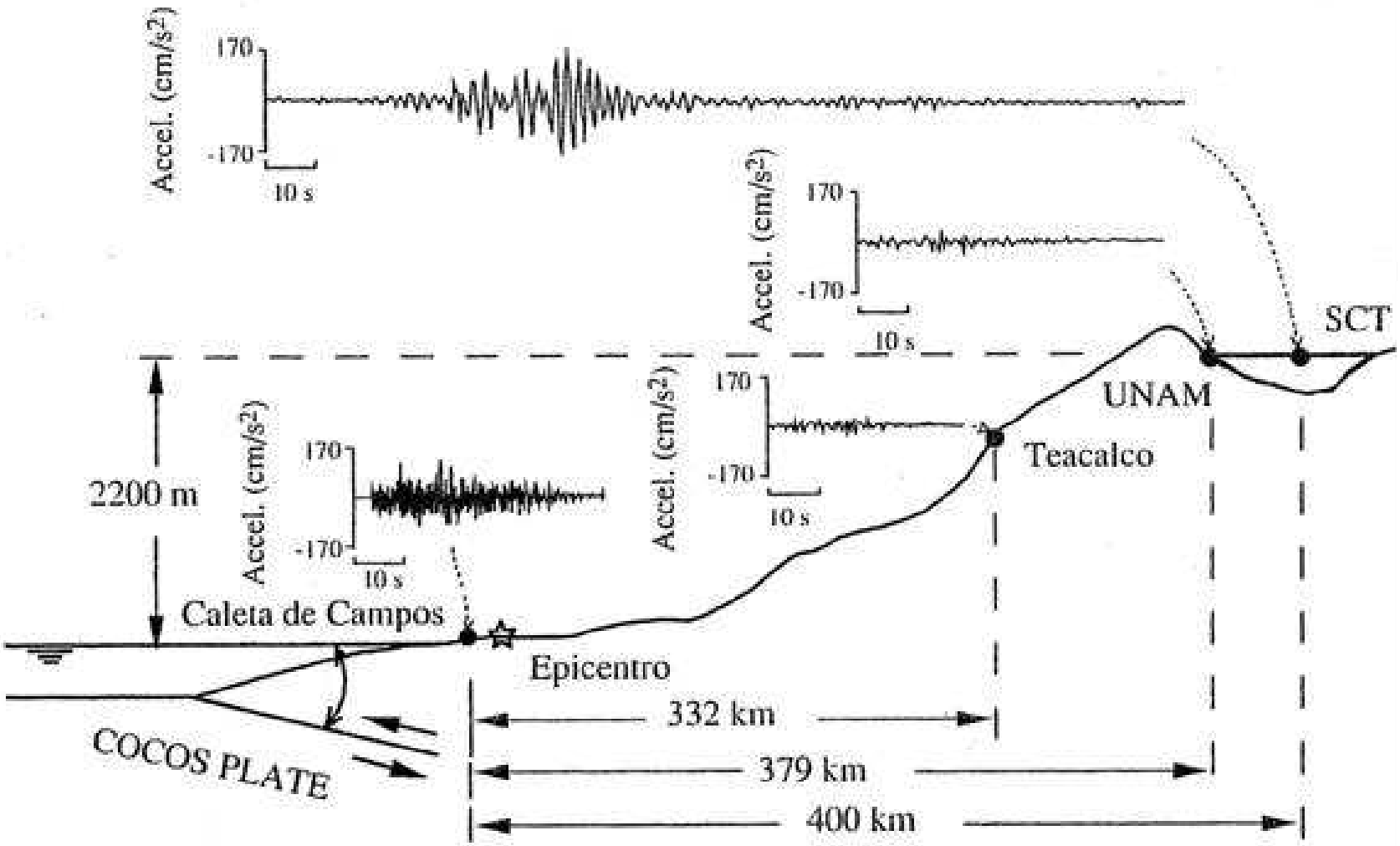
$$T_R = -\frac{V_R}{\ln\left(1 - P_{V_R}\right)}$$



NTC 2008

sottosuolo cat. A ($V_{S,30}$>800m/s)

Città del Messico (Terremoto del 1985)



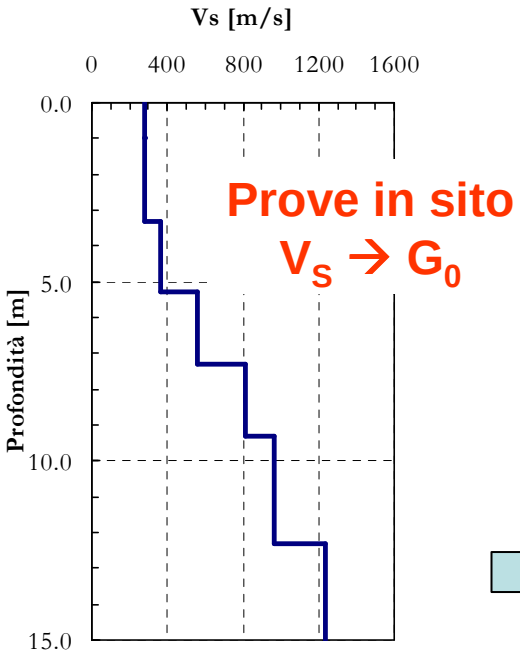
(Faccioli e Paolucci, 2005)

Studi di risposta sismica locale

NTC 2008 (3.2.2):
Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale **mediante specifiche analisi**, come indicato nel § 7.11.3. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III).

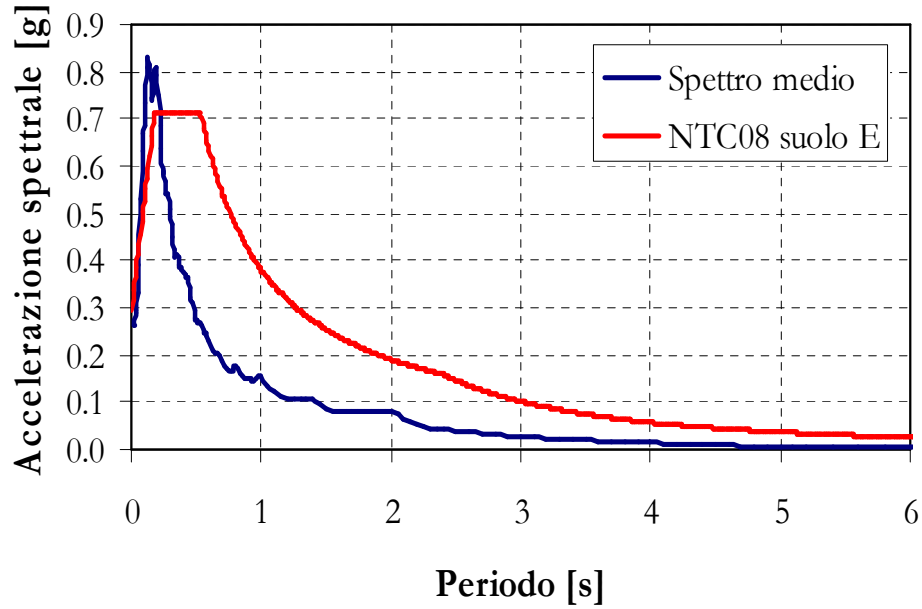
Esempio RSL

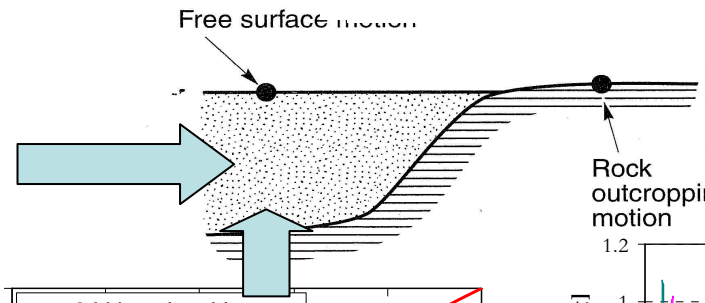
(Lai et al., 2009)

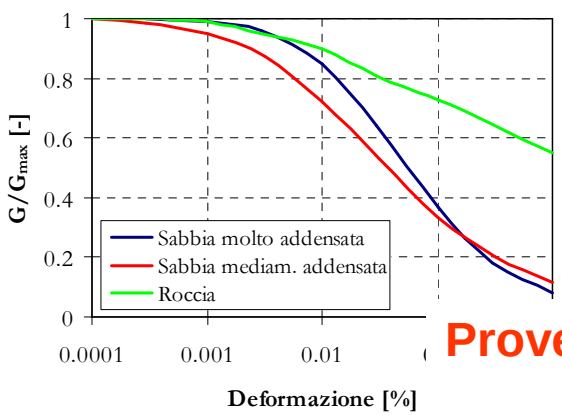


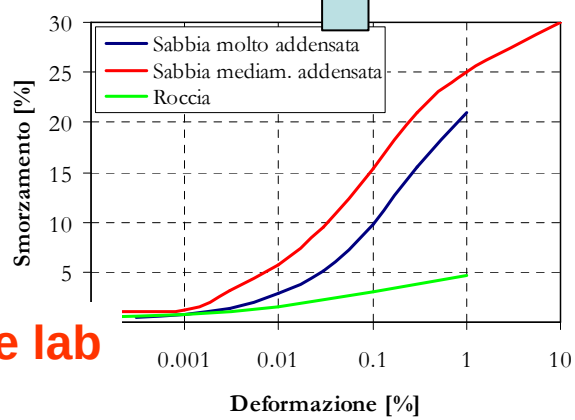
Prove in sito

$V_S \rightarrow G_0$

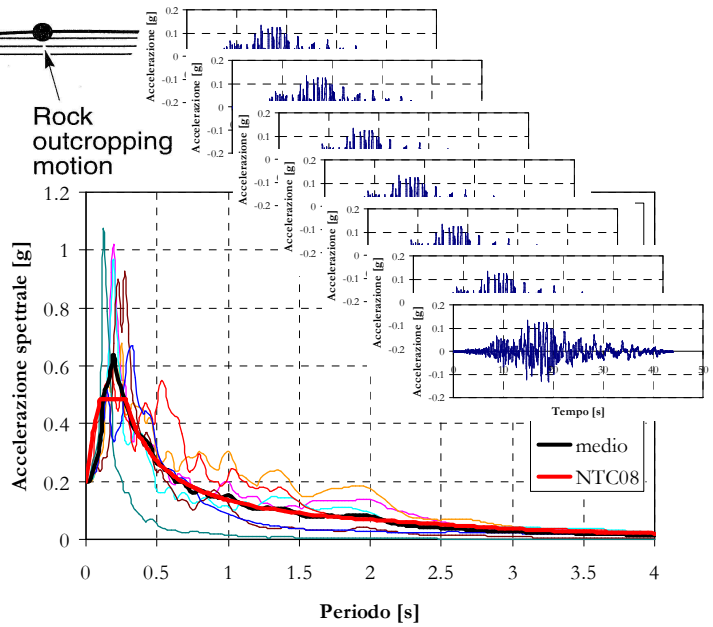








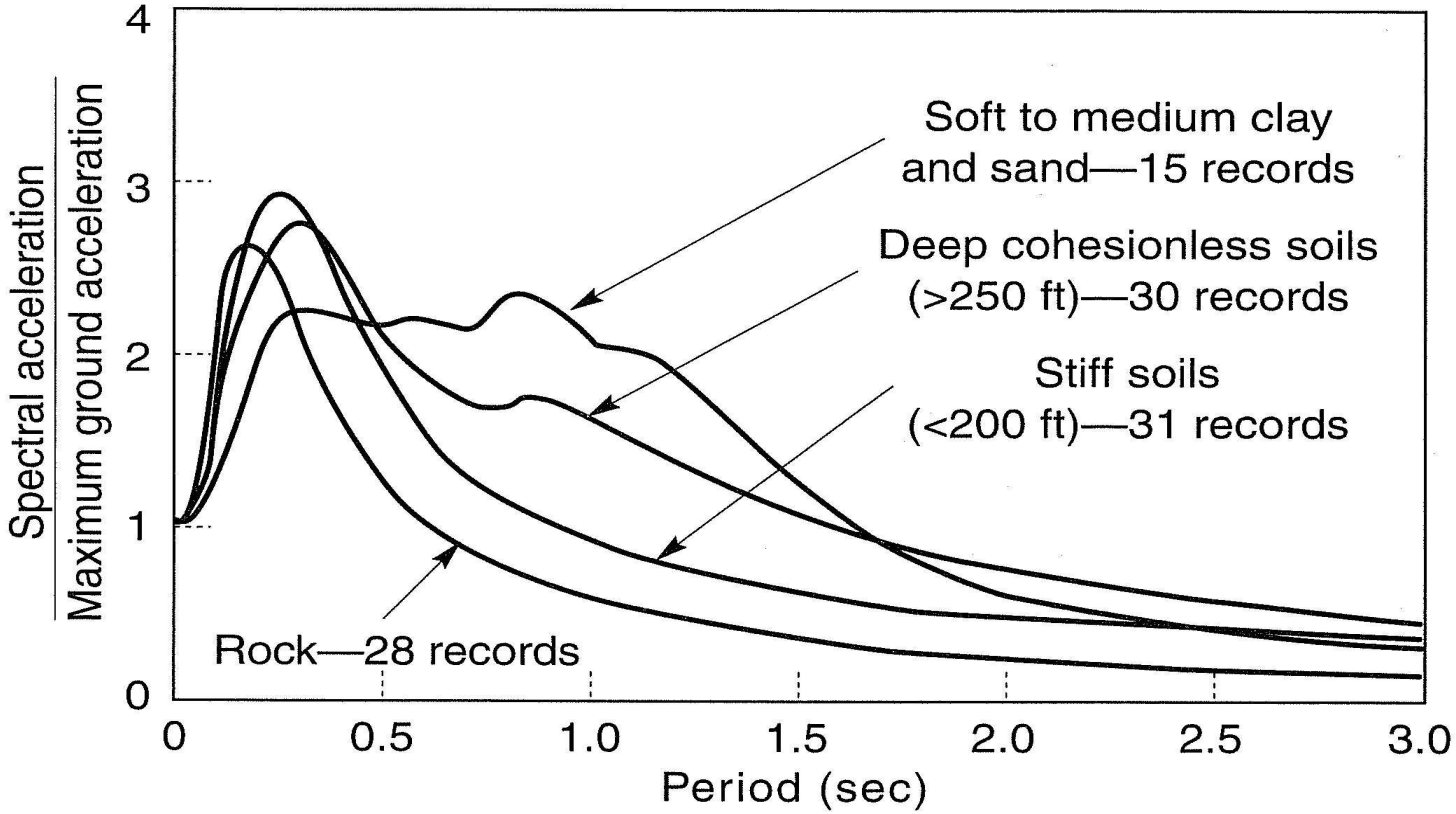
Prove lab



Studi di risposta sismica locale

NTC 2008 (3.2.2):
Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.3. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III).

Spettri di risposta per tipologie di sottosuolo

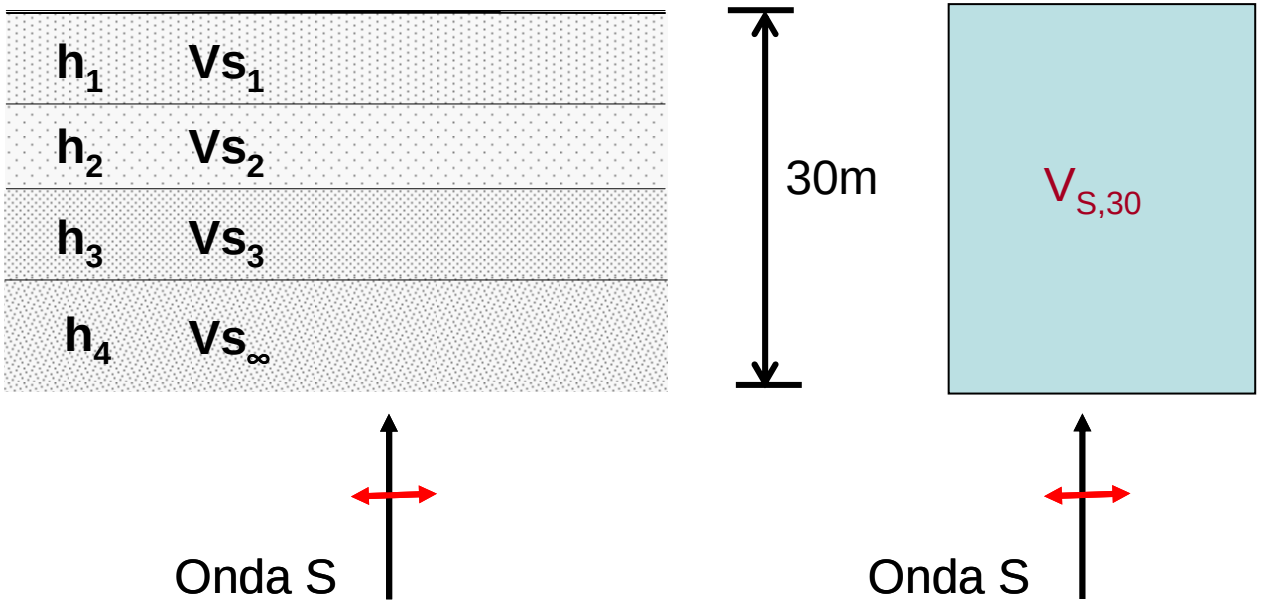


(Seed et al., 1976)

Stima semplificata RSL: $V_{S,30}$

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Rappresenta la velocità media in termini di lentezza, basata sul tempo che l'onda di taglio impiega a percorrere i 30 m

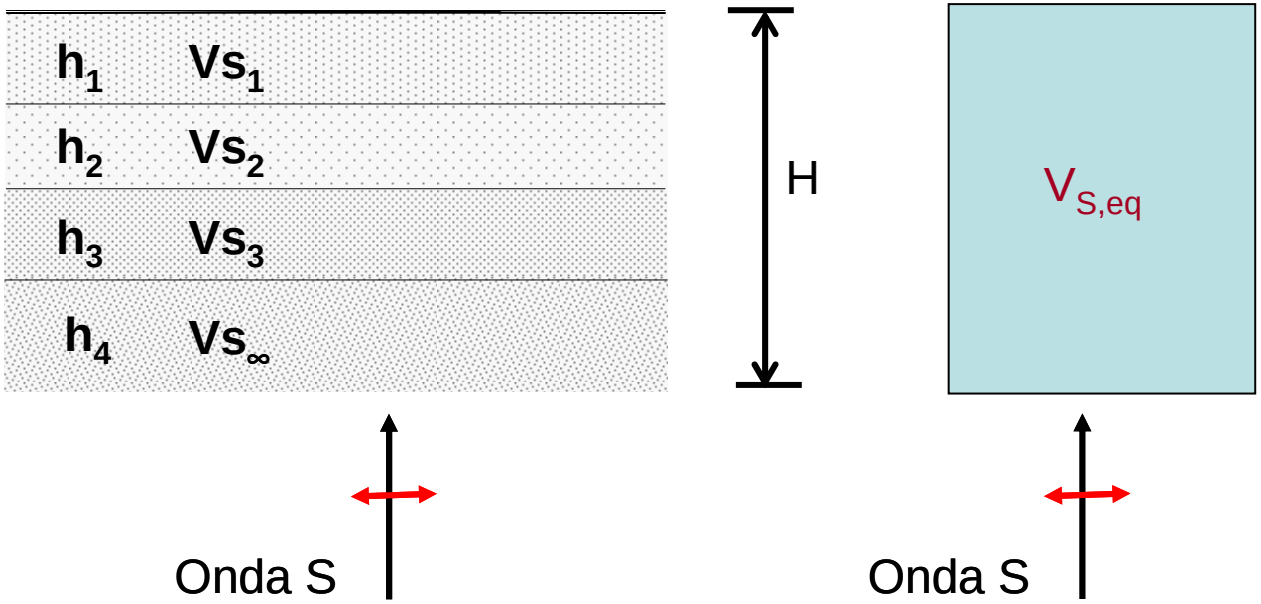


NB: 30m a partire dal piano di imposta della fondazione

Stima semplificata RSL: $V_{S,eq}$

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Rappresenta la velocità media in termini di lentezza, basata sul tempo che l'onda di taglio impiega a percorrere lo strato di spessore H



NB: 30m a partire dal piano di imposta della fondazione

Categorie di sottosuolo: revisione NTC ????

Categoria	Descrizione
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	*Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m,* posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

NB: le categorie di sottosuolo sono rilevanti ai soli fini della valutazione dell'azione sismica

EC8 & NTC08: categorie di sottosuolo

Categoria	$V_{s,30}$	N_{SPT}	c_u
A	> 800	-	-
B	360 – 800	>50	>250
C	180 - 360	15 ÷ 50	70 ÷ 250
D	< 180	< 15	< 70
E (C, D su A)			

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

velocità media pesata
(parità di tempo di viaggio)

Note:

Categoria E: depositi alluvionali di spessore 5-20m classificabili come sottosuolo C o D soprastanti un un substrato roccioso (bedrock) (sottosuolo A)

Categorie speciali S1 (argille tenere/limi molto plastici) e S2 (terreni soggetti a liquefazione/argille sensitive): richiedono studi specifici della risposta sismica locale

NTC 2008 (Udine)

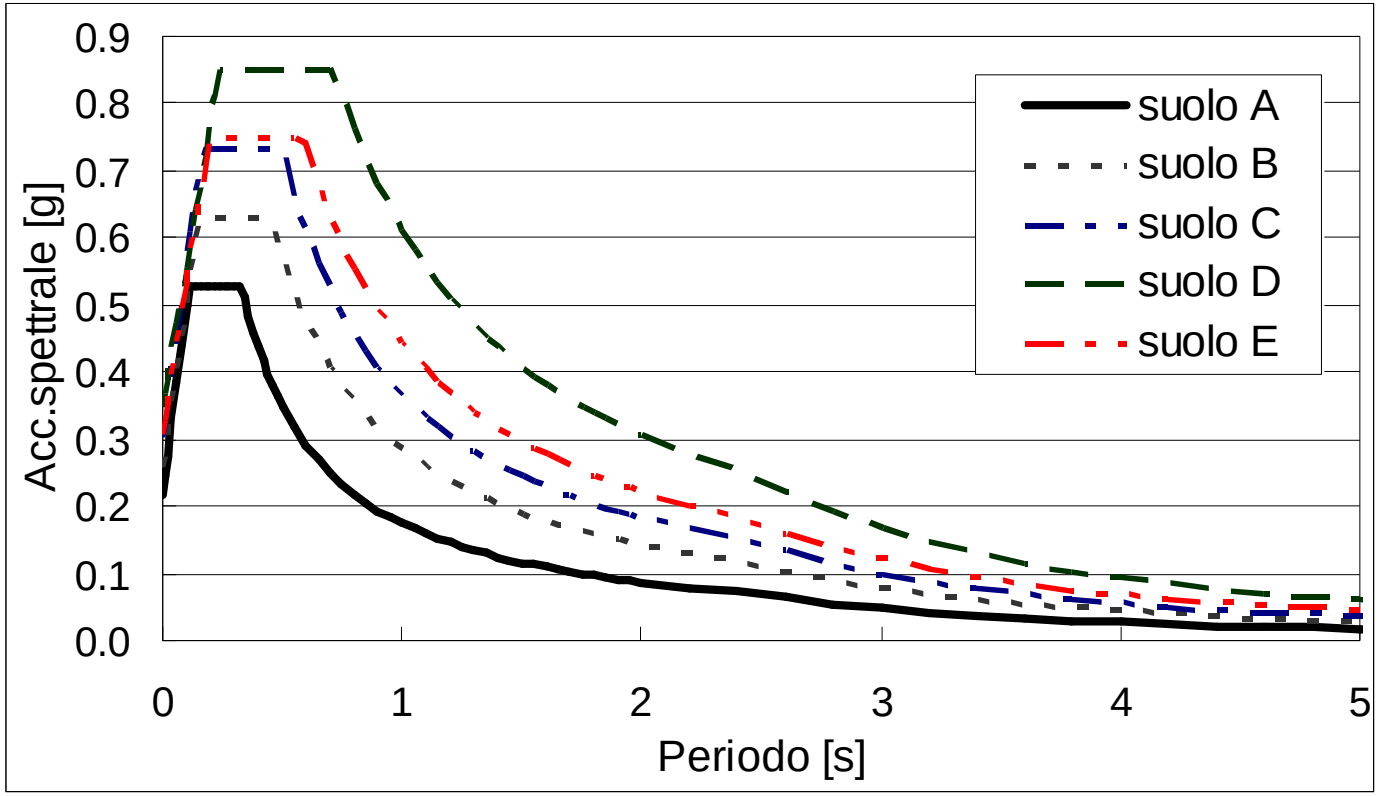
a_g	F_0	Tc*
0.216	**2.45**	**0.33**

Accelerazione di picco al suolo Valore di progetto

$$S \cdot a_g$$

SUOLO	S
A	1
B	1.19
C	1.38
D	1.61
E	1.42

Spettri di risposta elastici



Correlazioni V_S - N_{SPT}

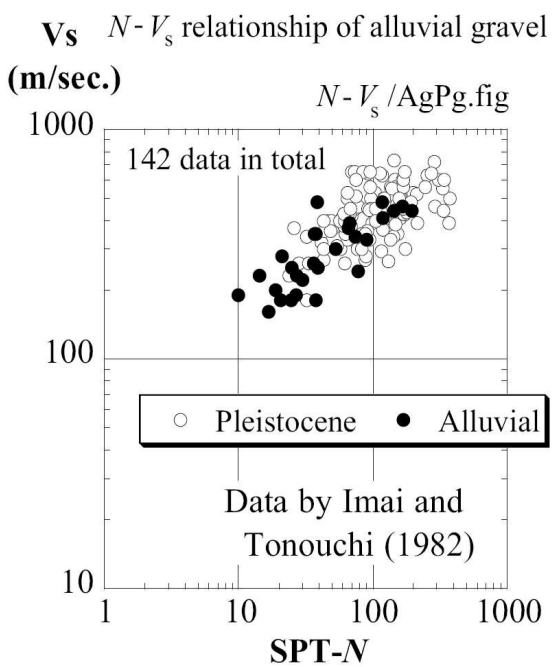
Per Esempio:Formula di Otha e Goto (1978)

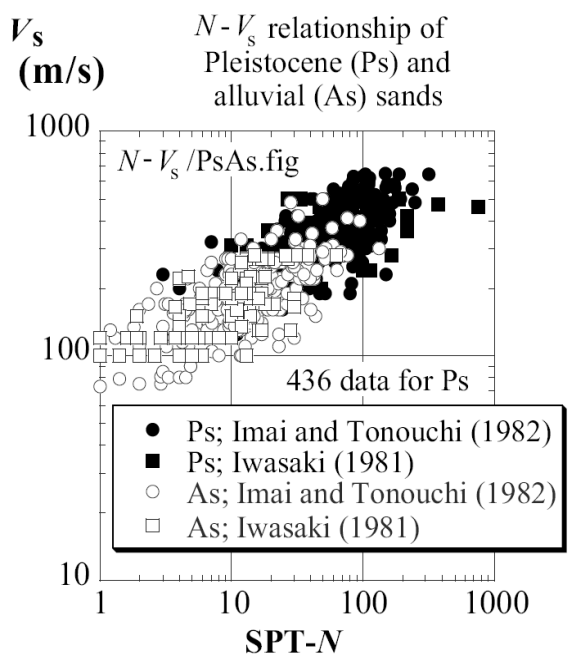
$$V_s = 69 \cdot (N_{60})^{0.17} z^{0.2} f_A f_G \qquad (m/s)$$

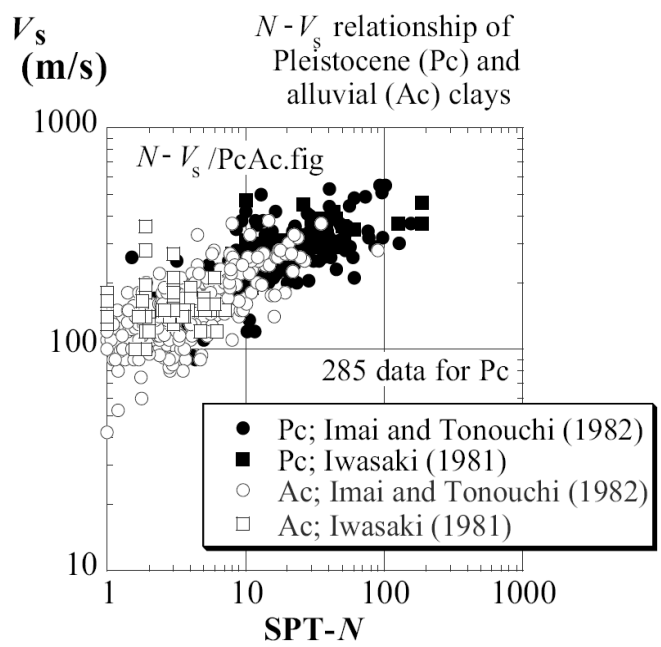
$$f_G = \text{f(tipo di terreno)}$$

$$f_A = \text{f(età del deposito)}$$

Attenzione alla dispersione dei dati usati per le correzioni → incertezza associata ??





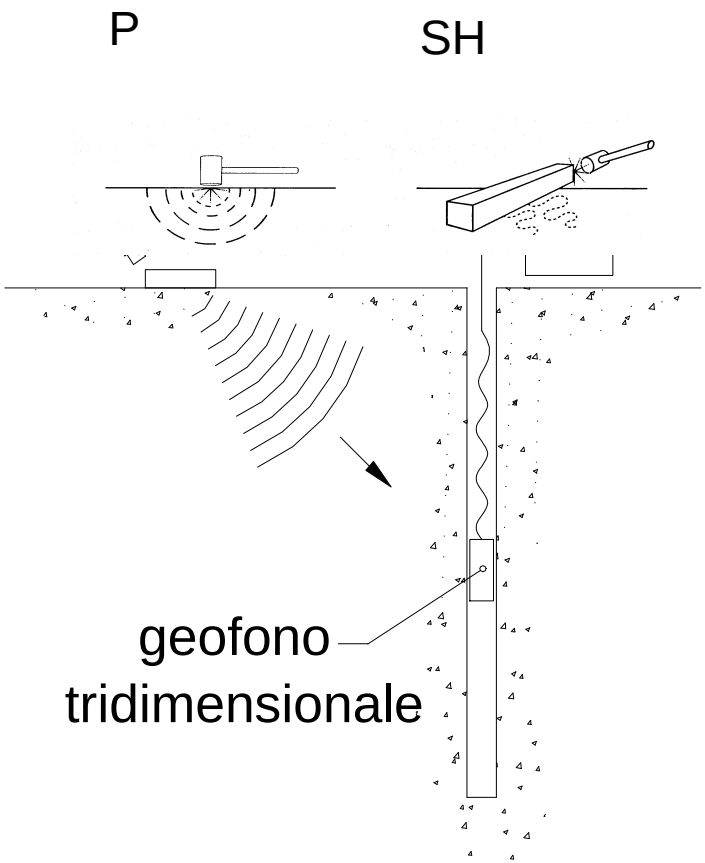


Metodi Geofisici

- Metodi Invasivi
  - Prove Cross-hole
  - Prove Down-hole
    - In foro
    - SCPT-SDMT
- Metodi Non-Invasivi
  - Prove sismica a rifrazione (onde SH)
  - Analisi delle onde superficiali
    - Metodi attivi (SASW, MASW)
    - Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)

Down-Hole

Un solo foro; minore sensibilità *verticalità* foro di sondaggio



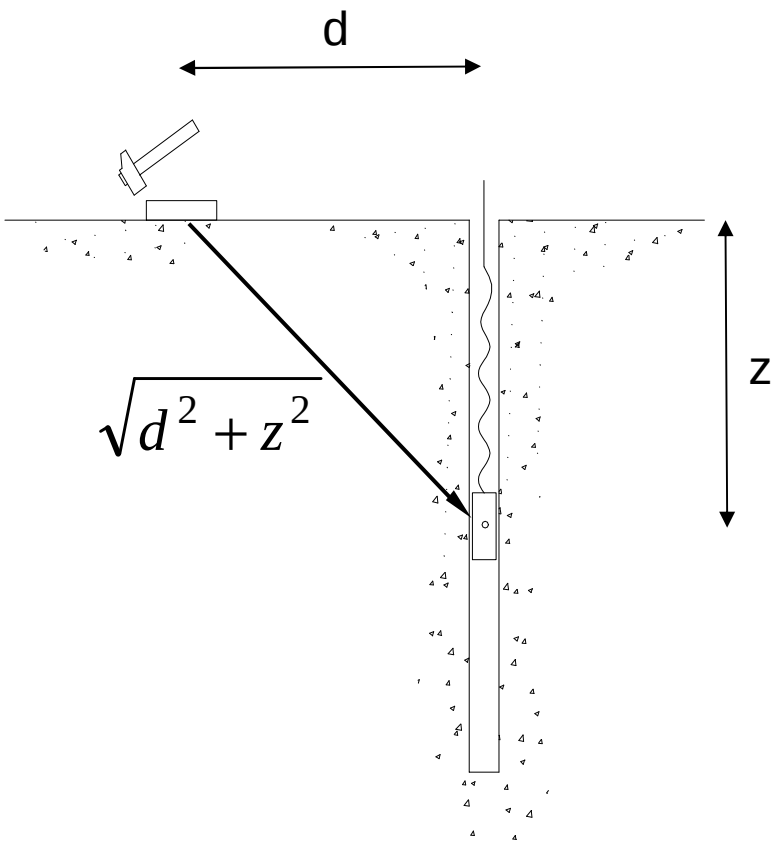
limitazione a profondità

di 50-60m

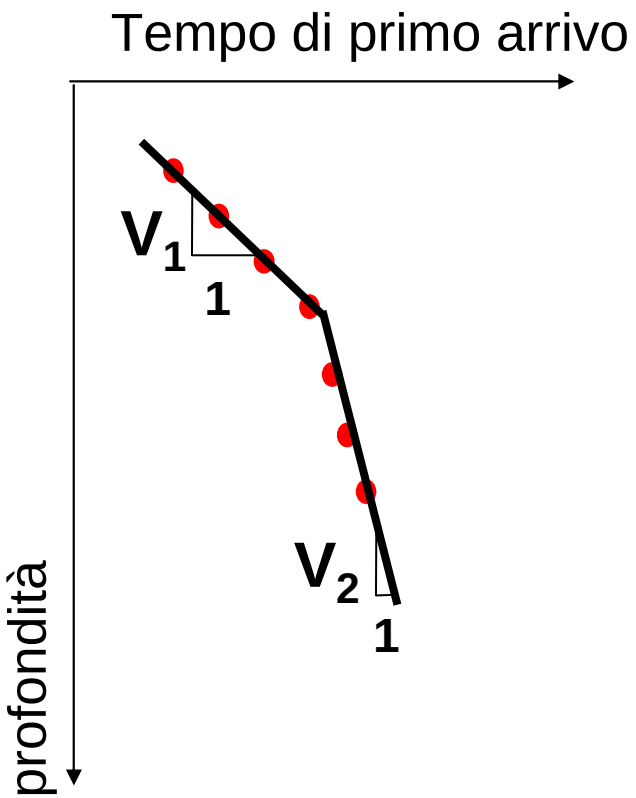
Metodi di interpretazione

- Metodo tempi intercetti
- Metodo true interval
- Inversione dei tempi di primo arrivo con raggi sismici curvi

Prova Down Hole

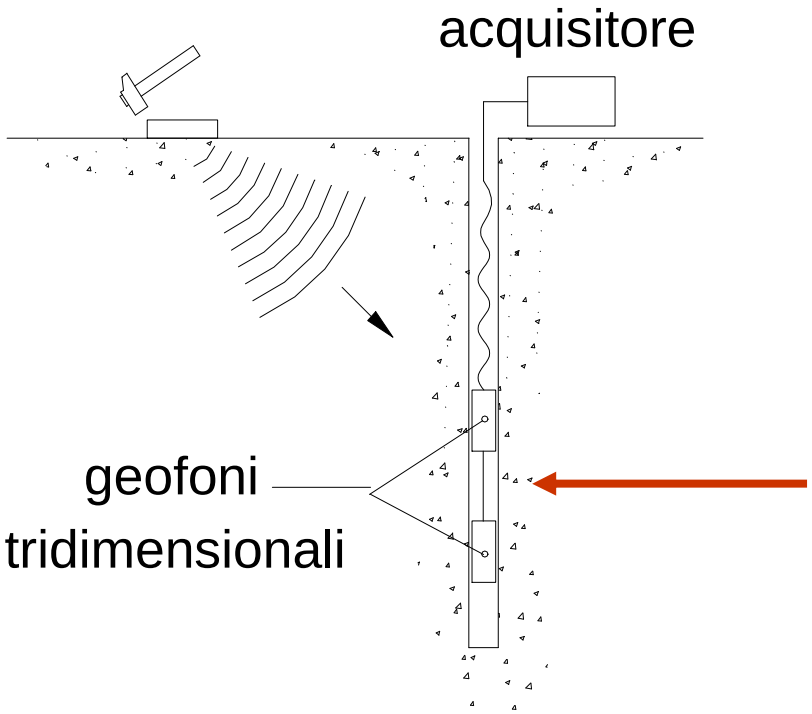


$$t_{corr} = t_{mis} \frac{z}{\sqrt{d^2+z^2}}$$



Down Hole

Due ricevitori (true interval)



$$V = \frac{\Delta z}{\Delta t_{corr}}$$

Analoga interpretazione con successive posizioni singolo geofono (pseudo-interval): fortemente sconsigliata

Metodi Geofisici

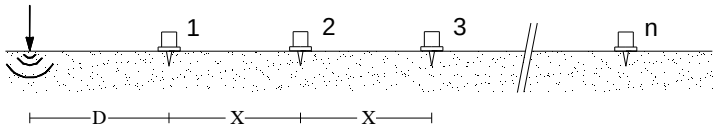
- Metodi Invasivi
  - Prove Cross-hole
  - Prove Down-hole
    - In foro
    - SCPT-SDMT

- Metodi Non-Invasivi
  - Prove sismica a rifrazione (onde SH)
  - Analisi delle onde superficiali
    - Metodi attivi (SASW, MASW)
    - Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)

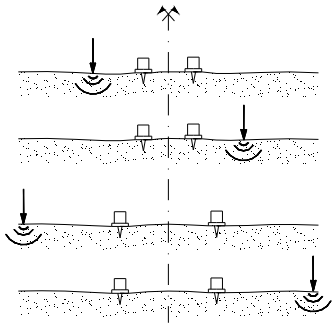
Prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SWM)

Tecniche Attive

Multistation
(f-k, τ-p, MASW, CSW,....)

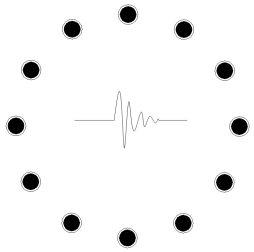


Two-station (SASW)

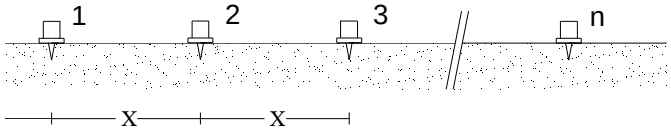


Tecniche passives

Spatial Array
SPAC, ESAC, f-k (FBDF, Capon, Music,…)



Linear array (ReMi)

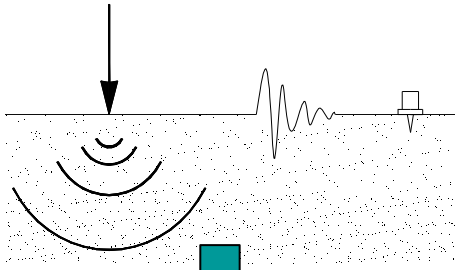


?

Prove SASW: diagramma di flusso

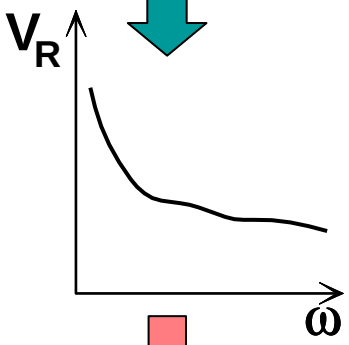
Acquisizione Dati

Campo di spostamenti in superficie



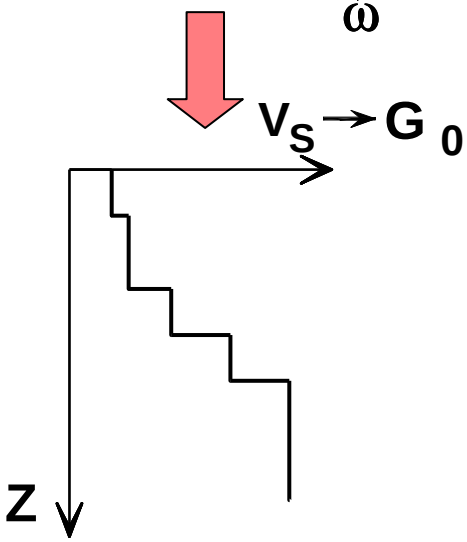
Analisi dei Segnali

Curva di dispersione delle onde di Rayleigh: velocità di fase vs frequenza



Processo di Inversione

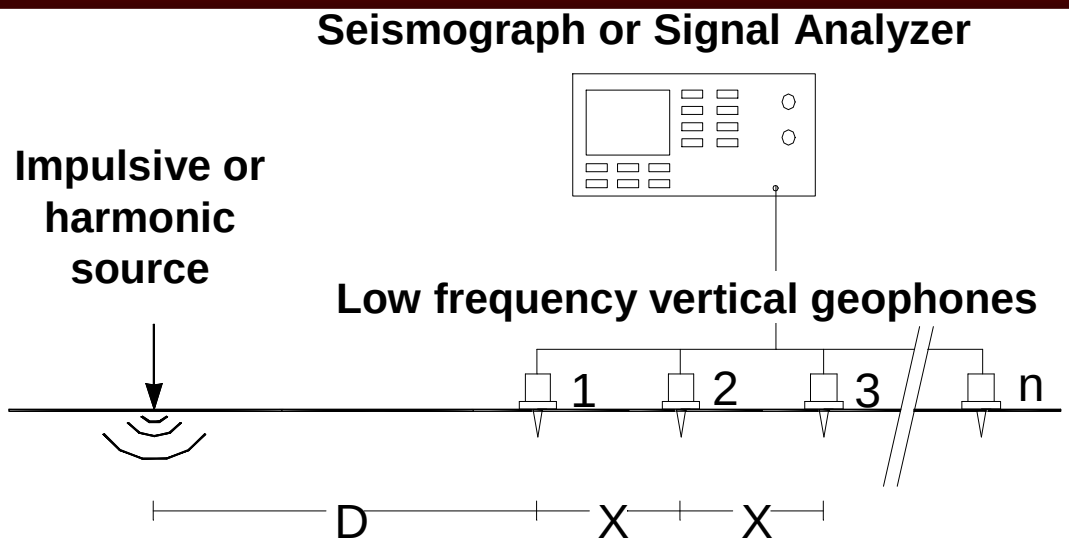
Profilo di velocità delle onde di taglio

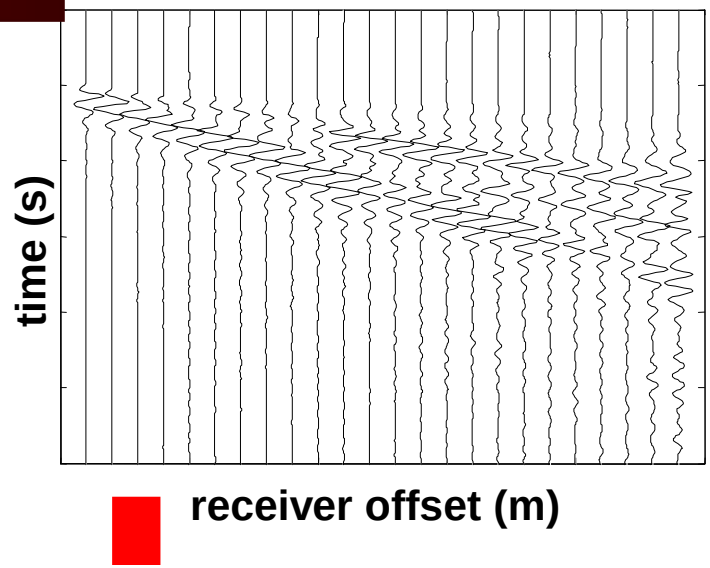


$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

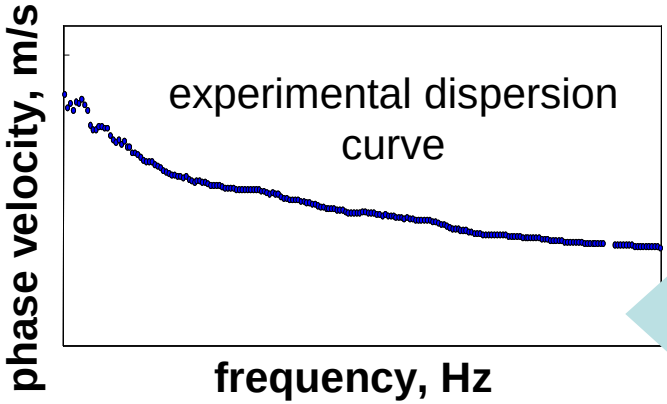
Modulo di rigidezza a taglio (G_0 vs profondità)

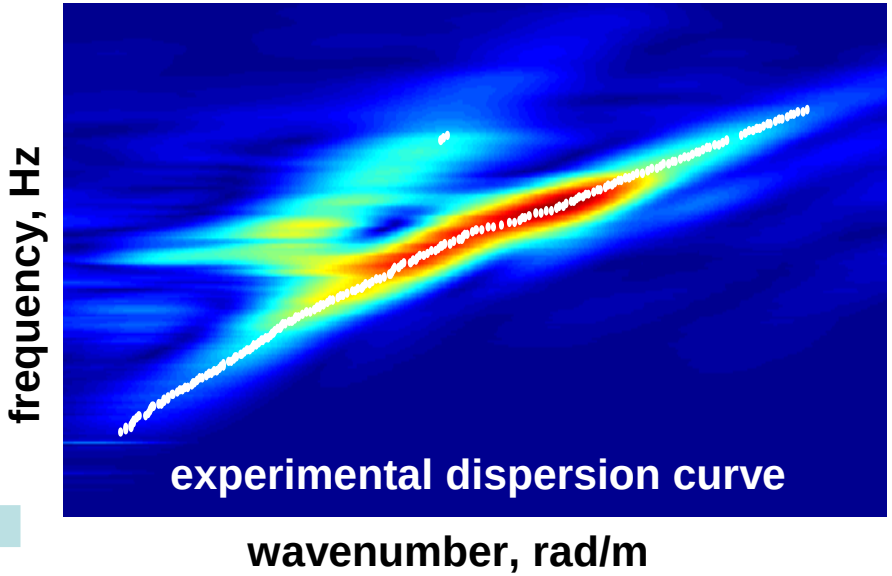
Prove MASW: processing





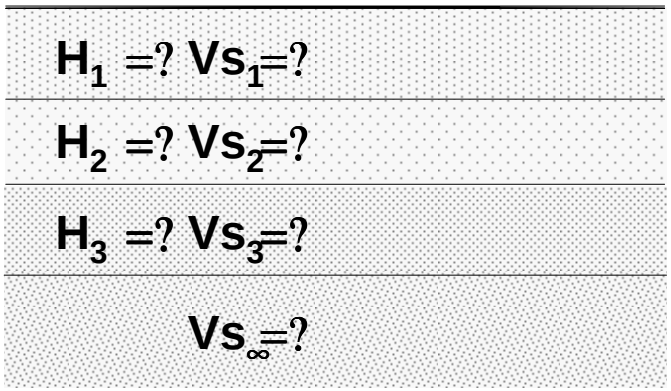
$$v_R(f) = \frac{2\pi \cdot f}{k\big|_{P=P_{\max}}} \qquad each \quad f$$



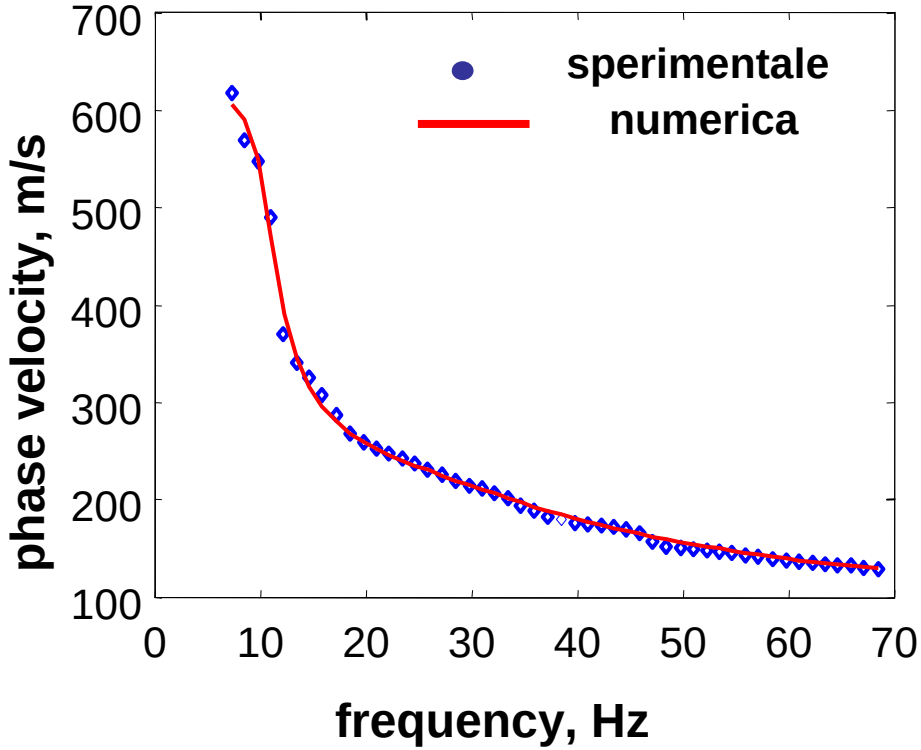


Il problema inverso

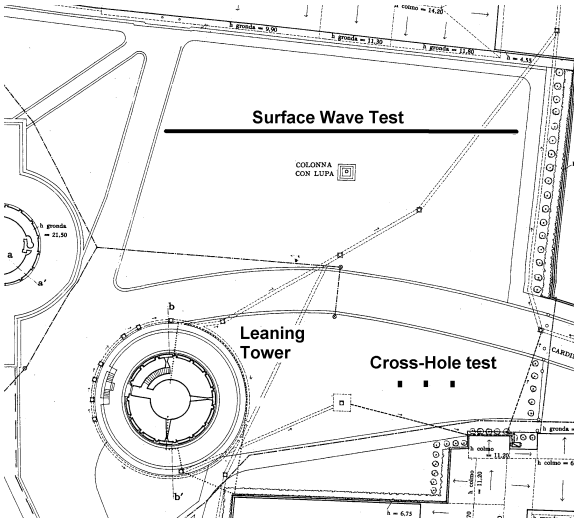
Obiettivo: trovare i parametri di modello tali da minimizzare la differenza tra curve di dispersione sperimentale e numerica

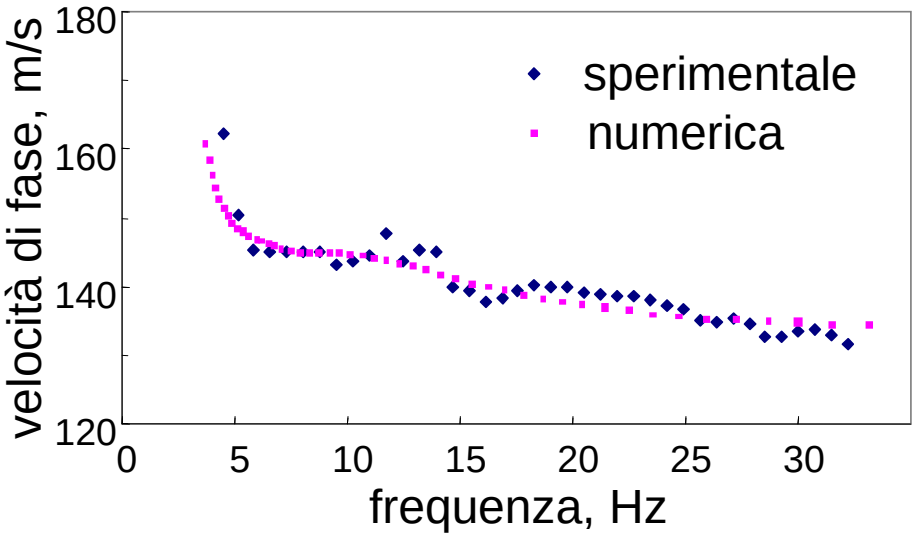


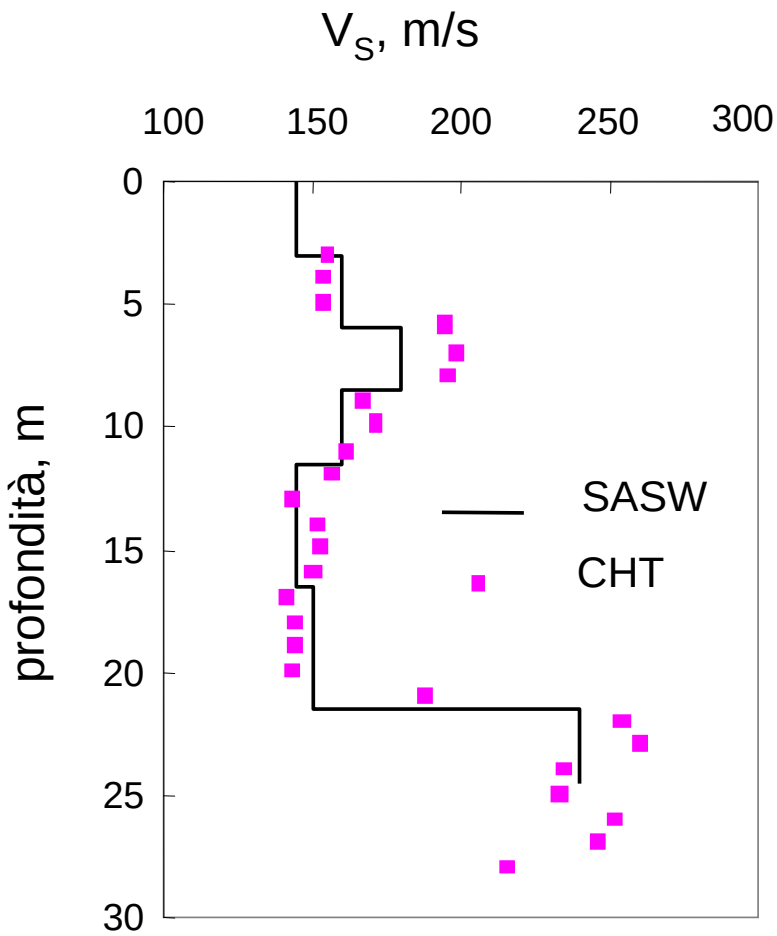
Strati piani e paralleli omogenei lineari elastici



Casi di Studio: Pisa





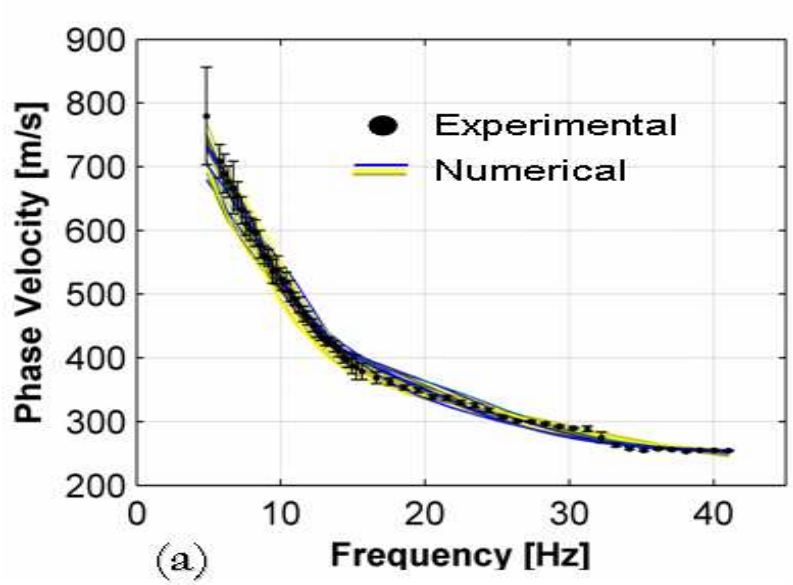


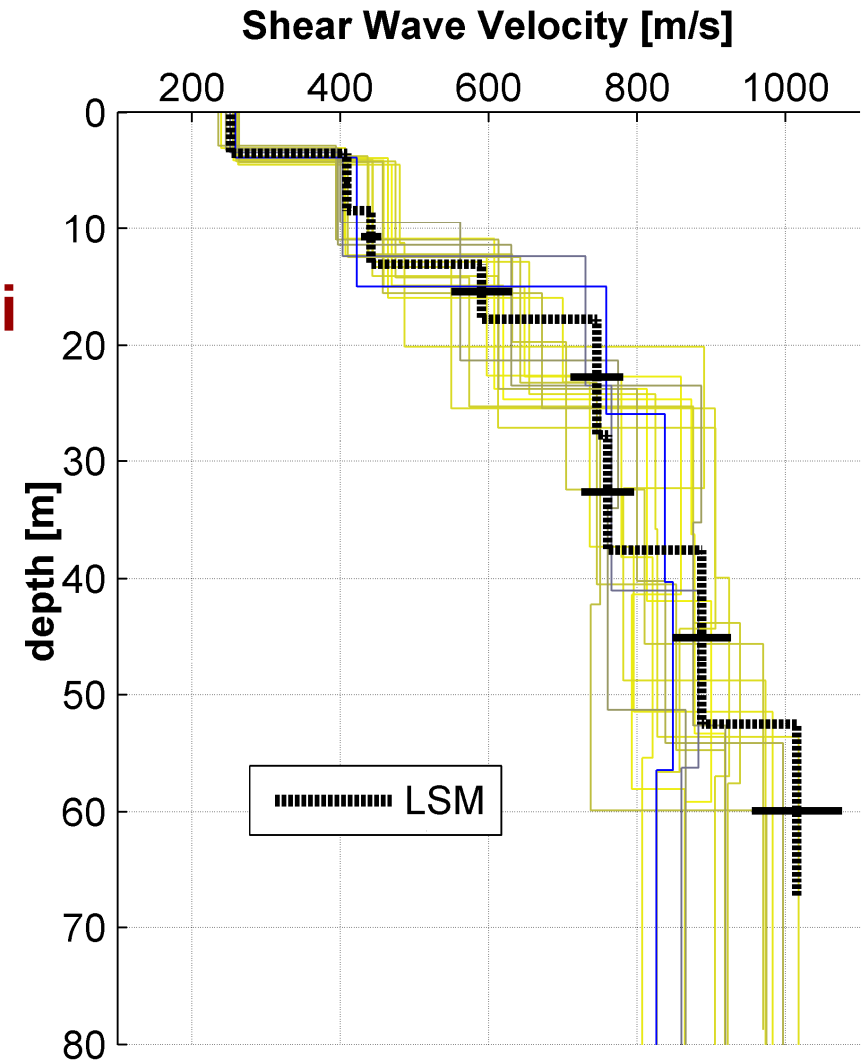
(Foti, 2003)

Non unicità della soluzione

Inversione con metodo Monte Carlo

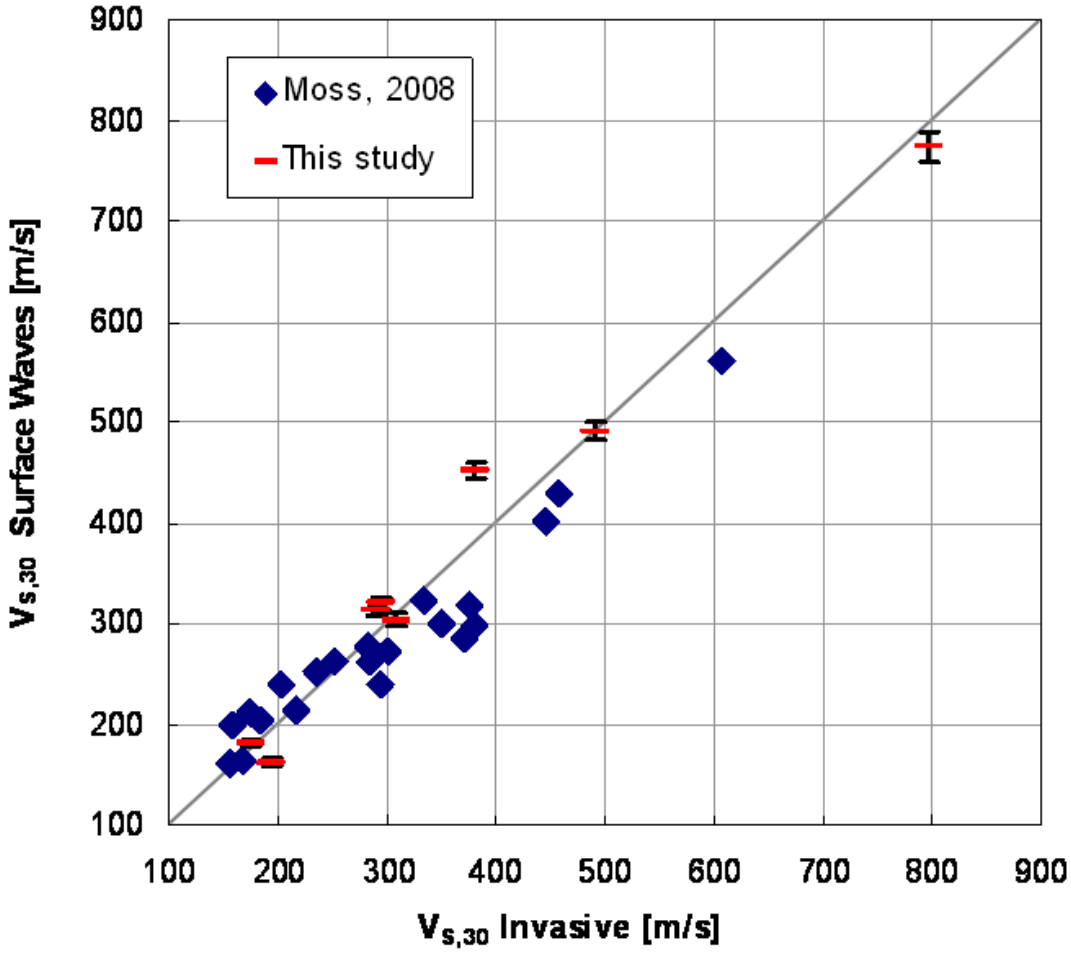
Profili Equivalenti





(Foti et al., 2007)

Accuratezza ed incertezza della stima di $V_{S,30}$

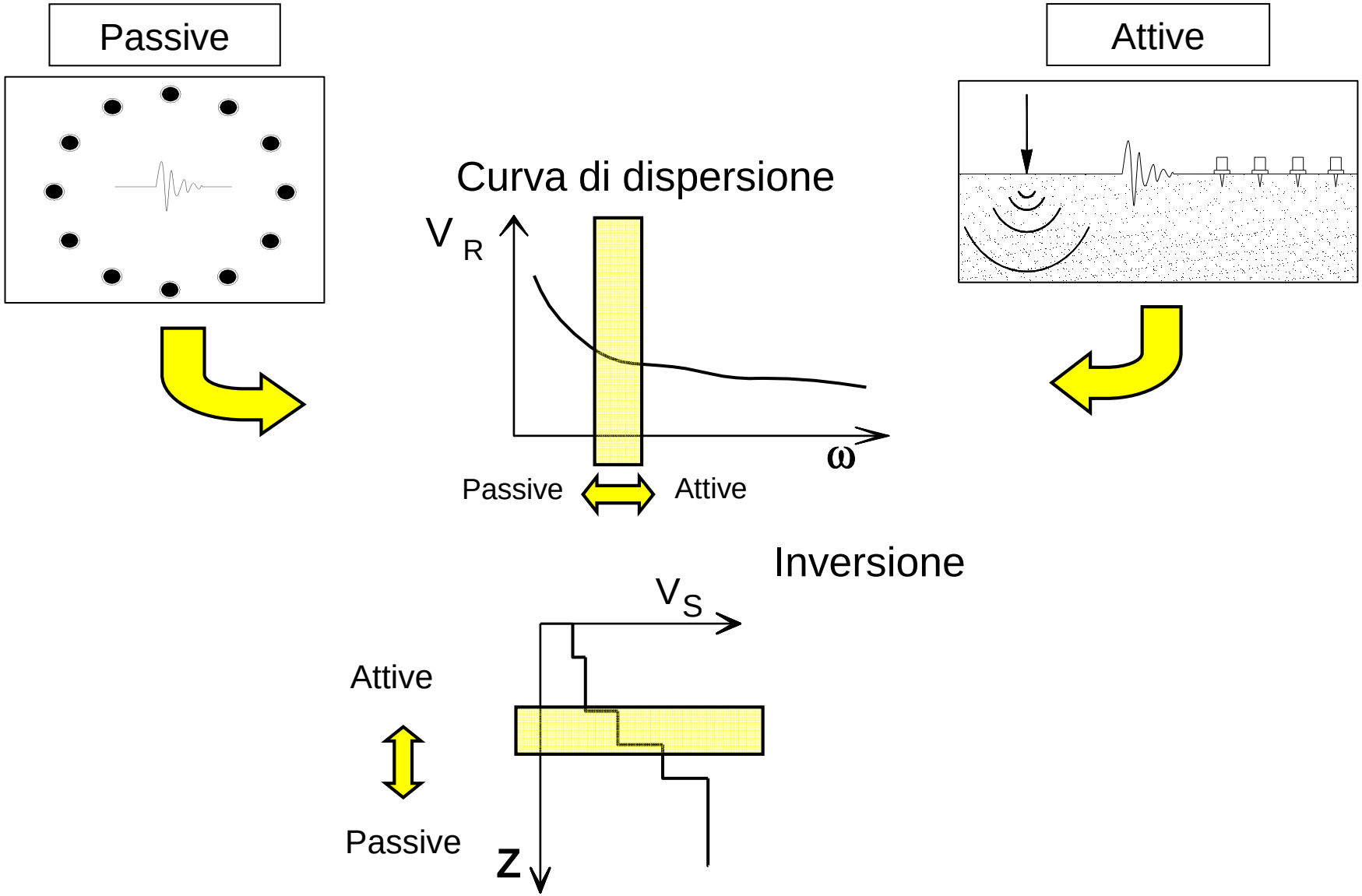


QC

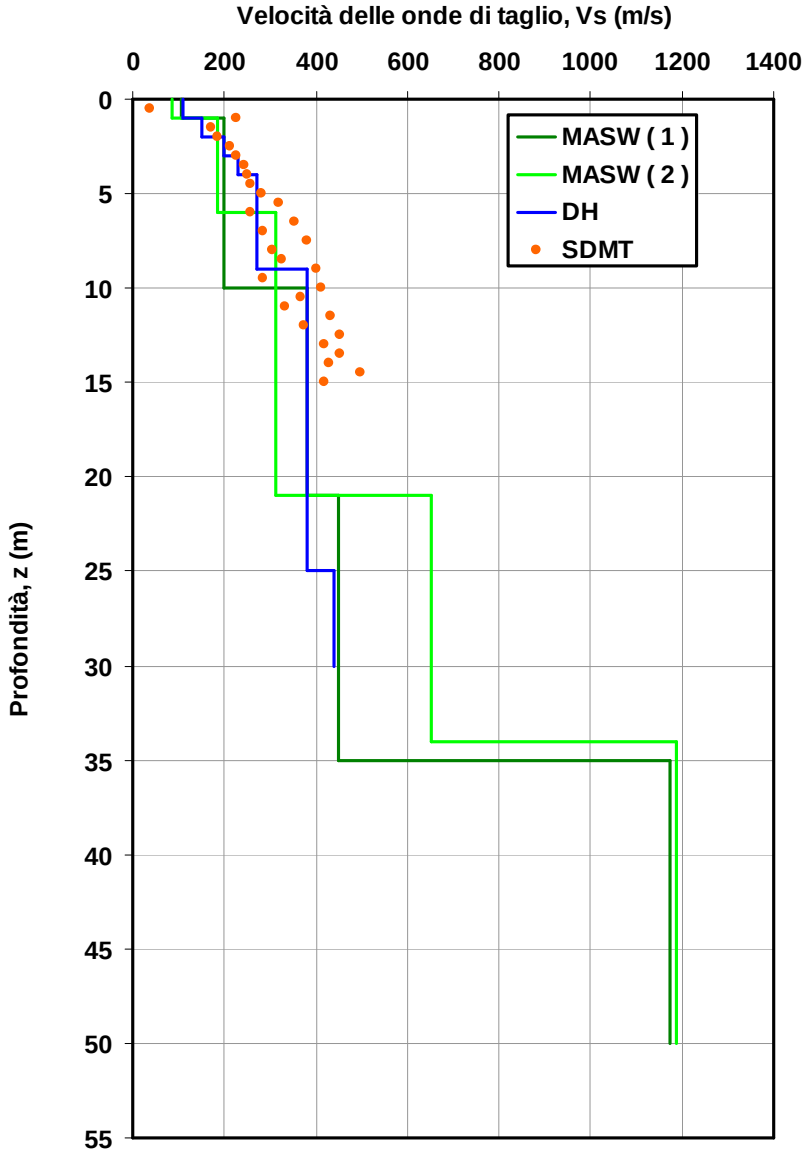
liq

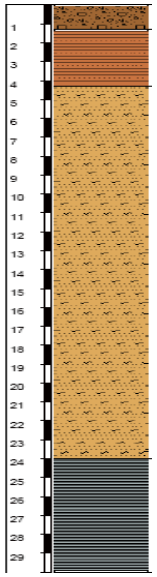
(Comina et al., 2010)

Integrazione Attive-Passive



PIANOLA – Sondaggio e prove DH - SDMT (maggio 2009)





Limo argilloso

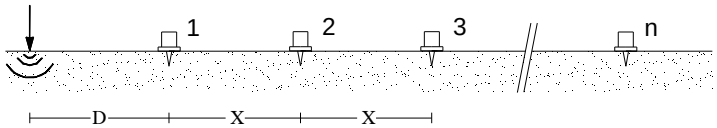
Sabbia, sabbia limosa

Limo argilloso, argilla limosa

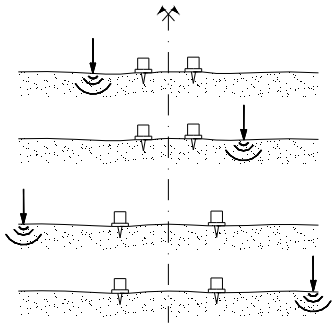
Prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SWM)

Tecniche Attive

Multistation
(f-k, τ-p, MASW, CSW,....)

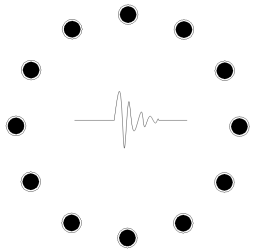


Two-station (SASW)

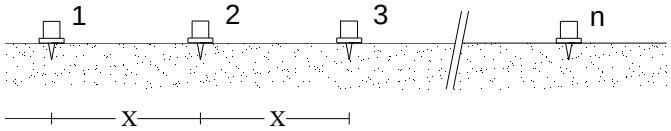


Tecniche passives

Spatial Array
SPAC, ESAC, f-k (FBDF, Capon, Music,…)



Linear array (ReMi)



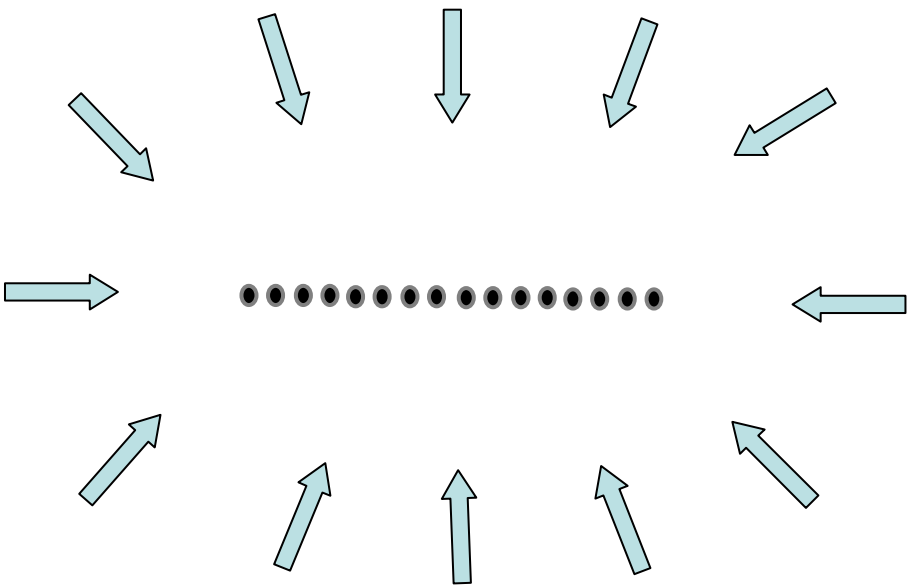
?

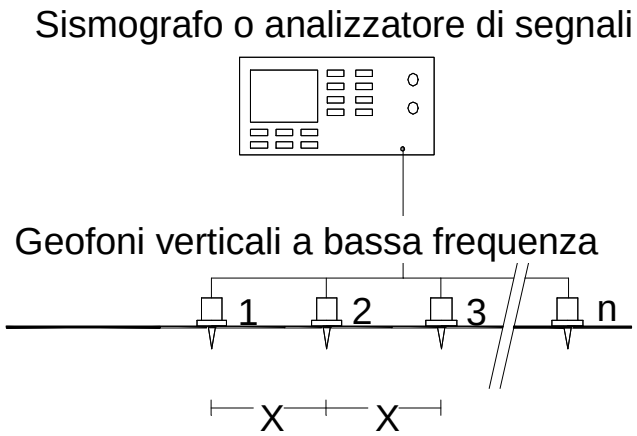
ReMi (Refraction Microtremors)

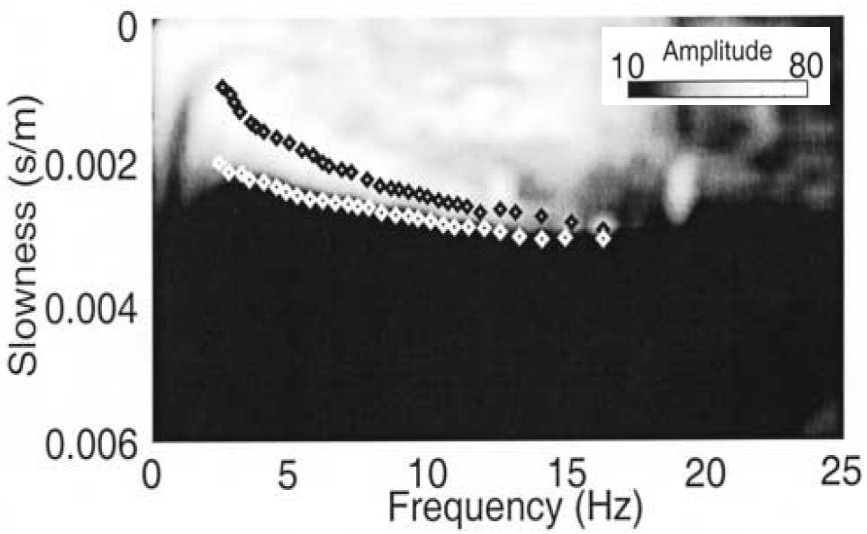
(Louie, 2001)

= Prove Passive con ricevitori allineati

Ipotesi di base: distribuzione spaziale uniforme delle sorgenti di vibrazione





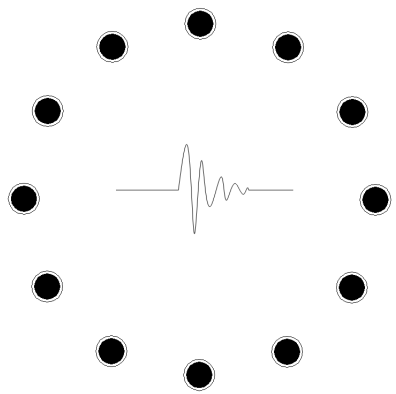


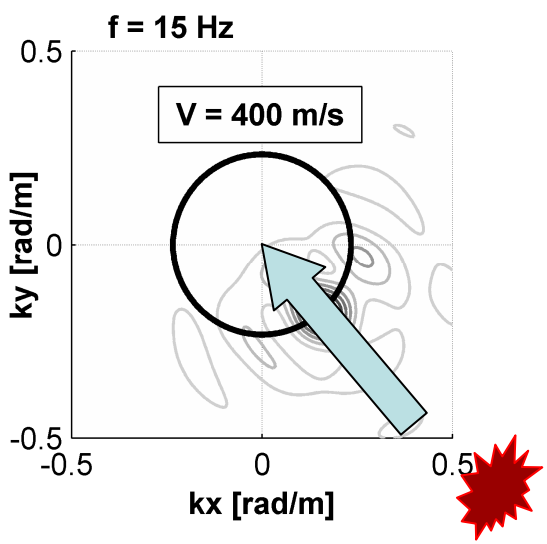
(Stephenson et al., 2005)

Prove Passive

Esempio: La Salle

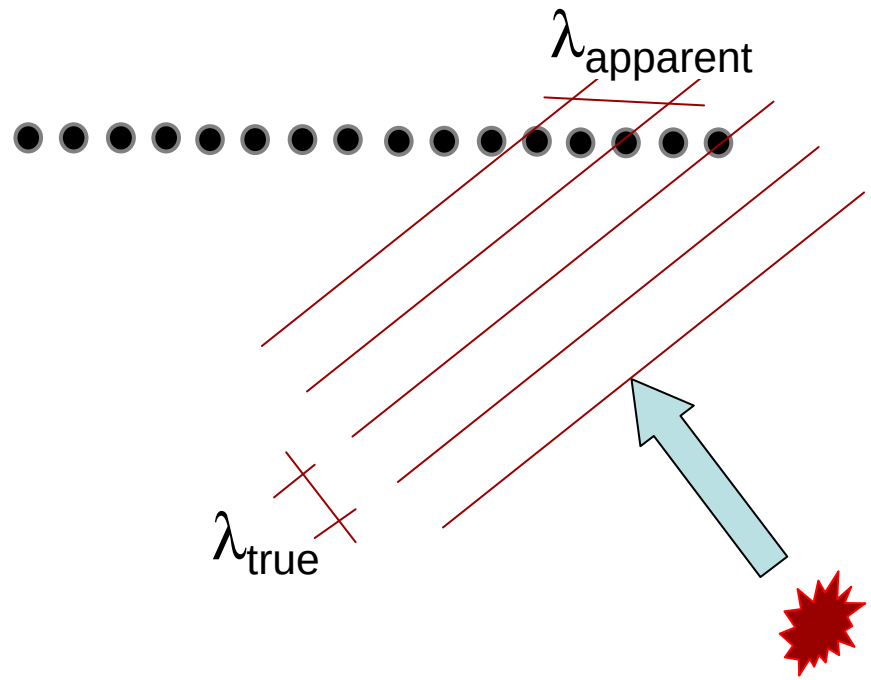
Disposizione dei geofoni (pianta)





(Foti et al., 2007)

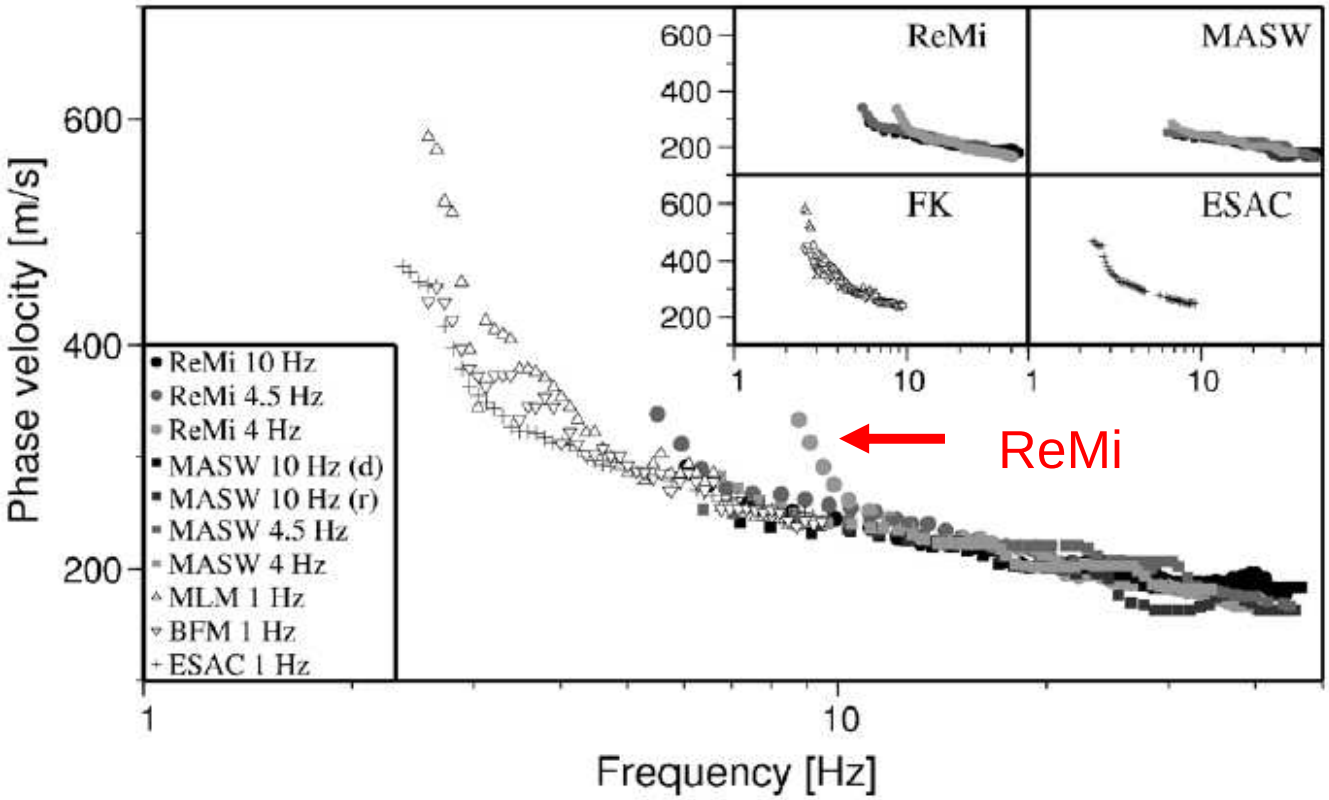
ReMi (pianta)



$v = f \cdot \lambda$

$\lambda_{apparent} > \lambda_{true} \rightarrow v_{apparent} > v_{true}$

Confronto Attive-Passive



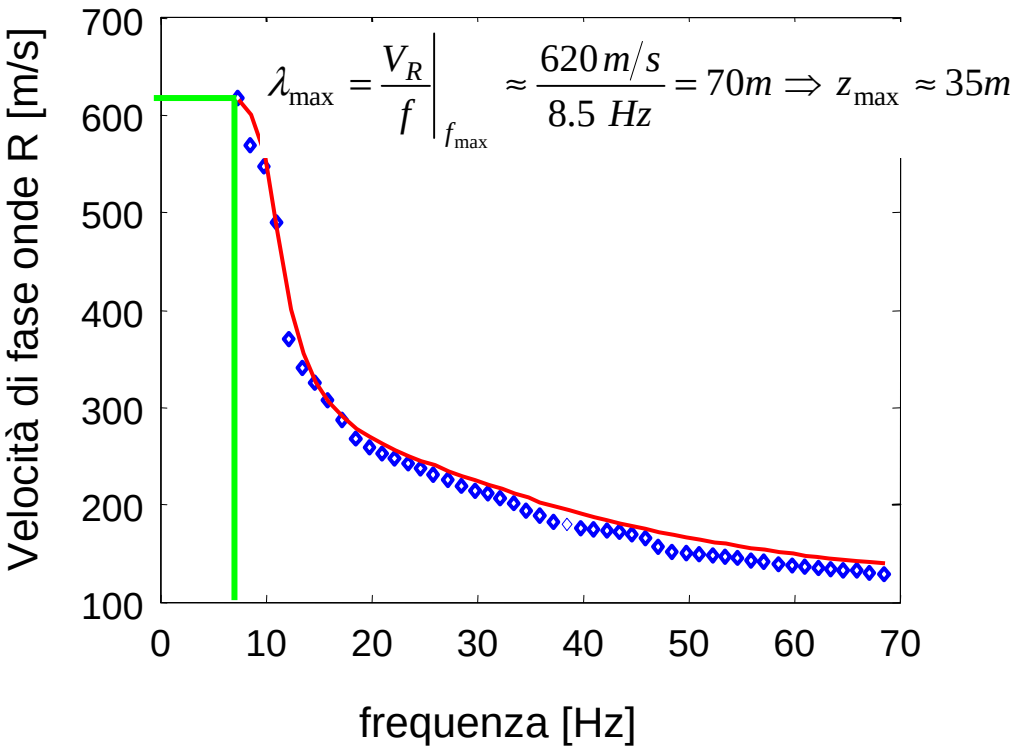
(Parolai et al., 2007)

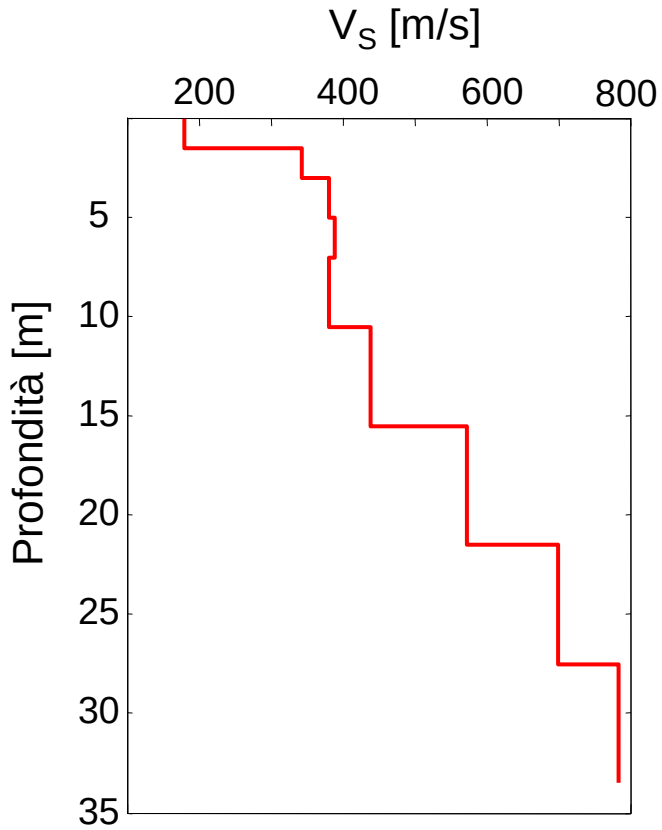
QC delle prove SWM

- Assenza marcate irregolarità topografiche e/o stratigrafiche
- Acquisizione
  - Preferire approcci multistation e array 2D per le passive
  - Frequenza naturale dei geofoni (max 4,5Hz)
  - Apertura totale-profondità ($z_{max} \approx ½ L_{stend}$)
  - Qualità registrazioni
- Processing
  - Verifica dato sperimentale (panel fk)
- Inversione
  - Metodo di inversione (automatico)
  - Congruenza curva dispersione numerica-sperimentale
  - Congruenza profondità raggiunta – intervallo frequenze ($z_{max} \approx ½\text{-}1/3\ \lambda_{max}$)
  - Modi superiori (se andamento irregolare)

Criteri di verifica delle prove SWM

- Corrispondenza curva dispersione numerica-sperimentale
- Congruenza profondità raggiunta – range frequenze ($z_{max} \approx$ ½-1/3 λ_{max})





liq end

Liquefazione

- Sollecitazioni cicliche inducono, in condizioni drenate, riduzione di volume.
- La tendenza a ridurre il volume è più marcata nei terreni sciolti
- In condizioni non drenate, tale tendenza genera sovrappressioni interstiziali (u)
- Come conseguenza si riduce la resistenza al taglio, sino ad annullarsi in condizioni estreme ($u=\sigma$)

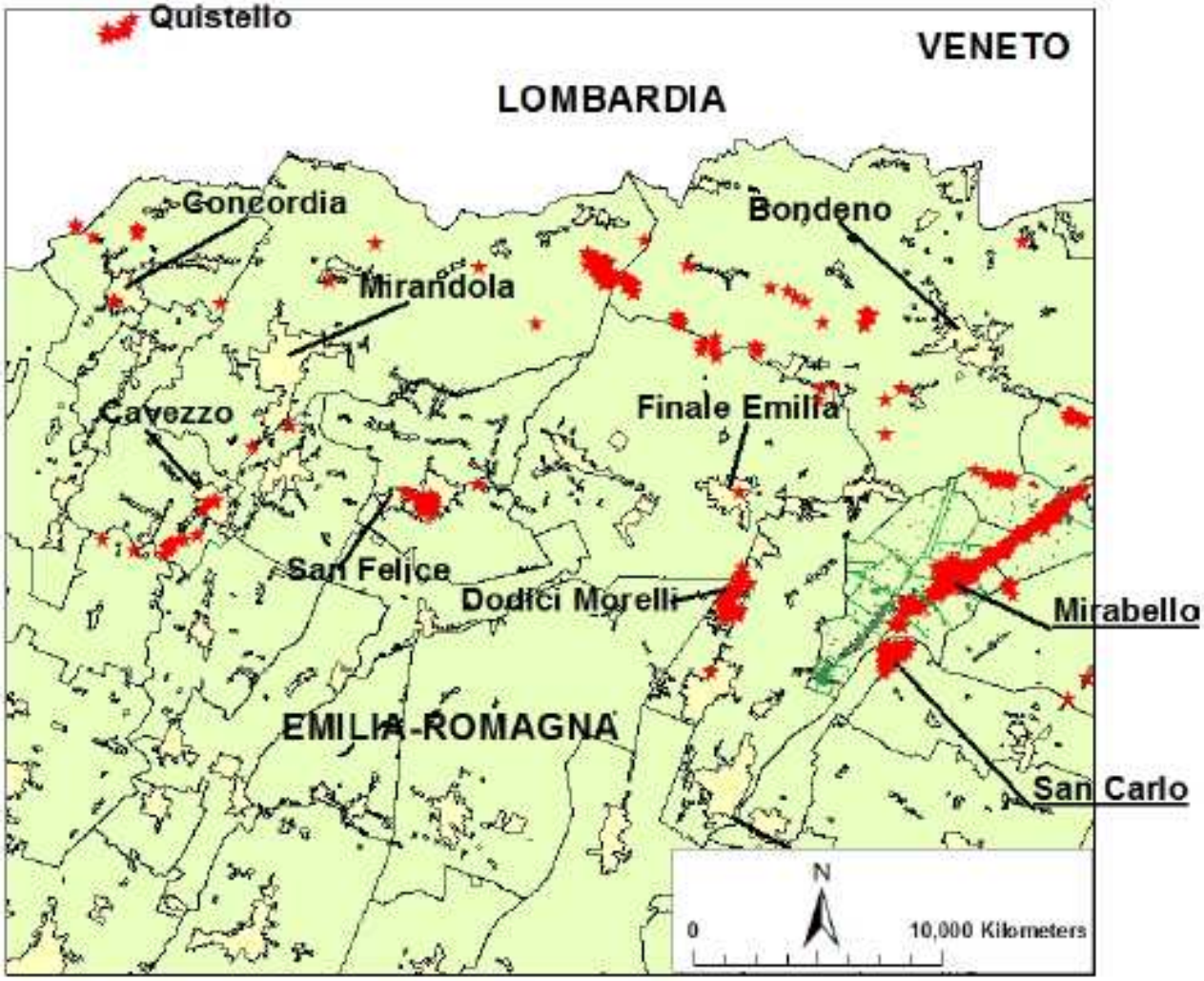
$$\tau_f = \sigma' \tan \phi' = (\sigma - u) \tan \phi'$$

NB: *Nel caso di sisma le condizioni sono praticamente sempre non drenate anche per terreni a grana grossa*

Terremoto Emiliano del 2012

Il terremoto che ha colpito la pianura padana-emiliana il 20 maggio 2012 ha prodotto diffusi ed estesi fenomeni di liquefazione

Localizzazione dei casi di liquefazione osservati



(Cortesia prof. G. Vannucchi – UniFI)

Manifestazioni di liquefazione osservate in Emilia

Foto: cortesia
prof. G. Vannucchi
UniFI

Composizione granulometrica terreni liquefacibili

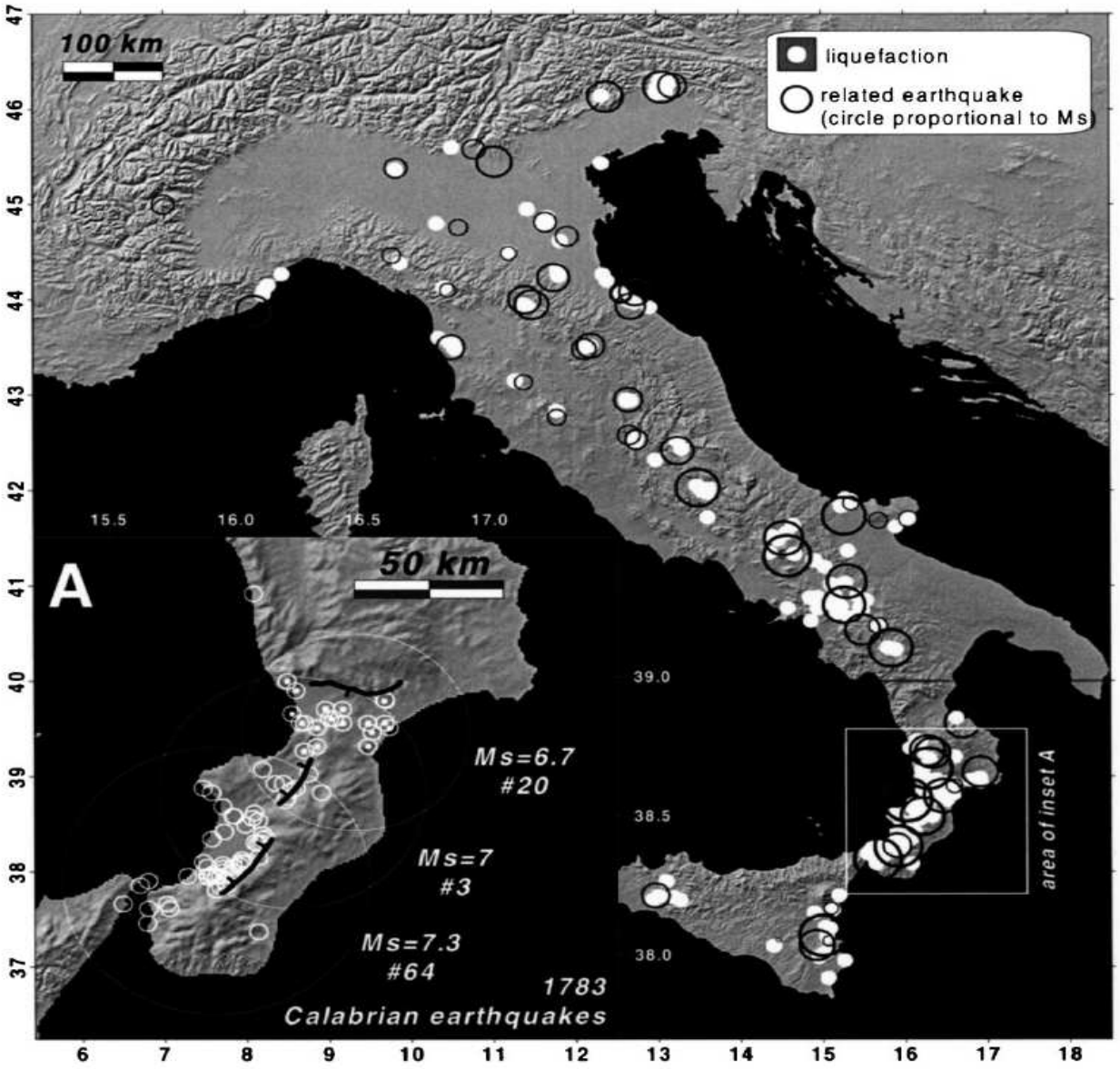
Principalmente sabbie, talvolta limi non plastici e ghiaie confinate

Granulometria uniforme e la presenza di particelle arrotondate portano ad una struttura del terreno che massimizza i vuoti interstiziali

Criteri Cinesi (terreni liquefacibili se tutti soddisfatti):

- frazione di materiale fine con particelle di diametro $d \leq 0.005$ mm minore del 15%
- limite liquido $LL \leq 35\%$
- contenuto d'acqua naturale ≥ 0.9 LL
- indice di liquidità ≤ 0.75

La liquefazione in Italia



(Galli, 2000)

NTC2008

verifica liquefazione: motivi di esclusione (or)

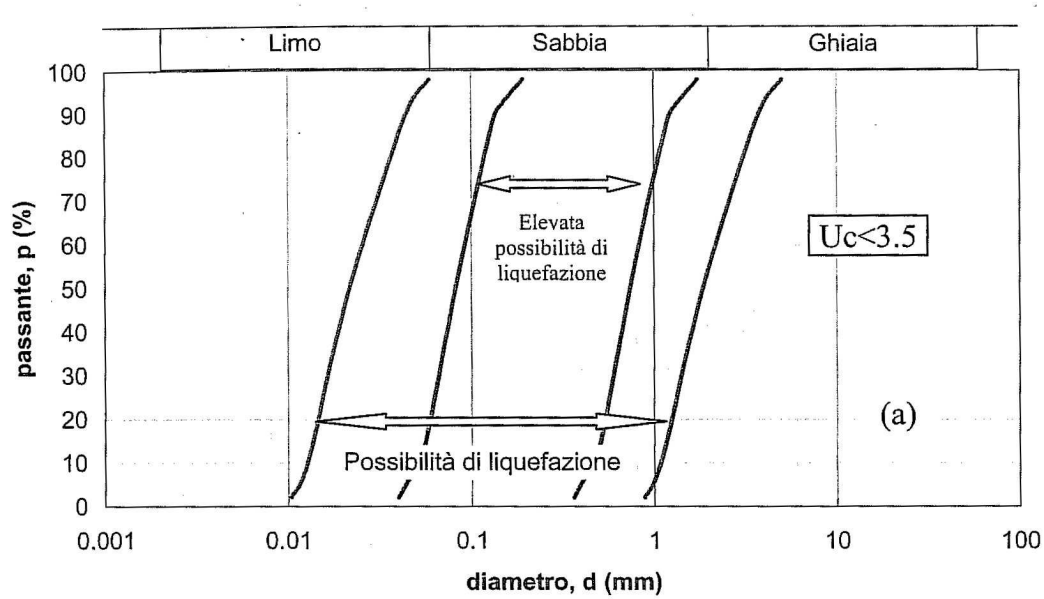
- *Magnitudo attesa* ***M*** **< 5**
- *accelerazione di picco al suolo di progetto* $S\boldsymbol{a_g}$ **< 0.1 g**
- *profondità falda dal p.c.* $\boldsymbol{z_w}$ **> 15m**
- criterio granulometrico (fuso terreni liquefacibili)
- per sabbie pulite

SPT	$(N_1)_{60} > 30$
CPT	$q_{c1N} > 180$

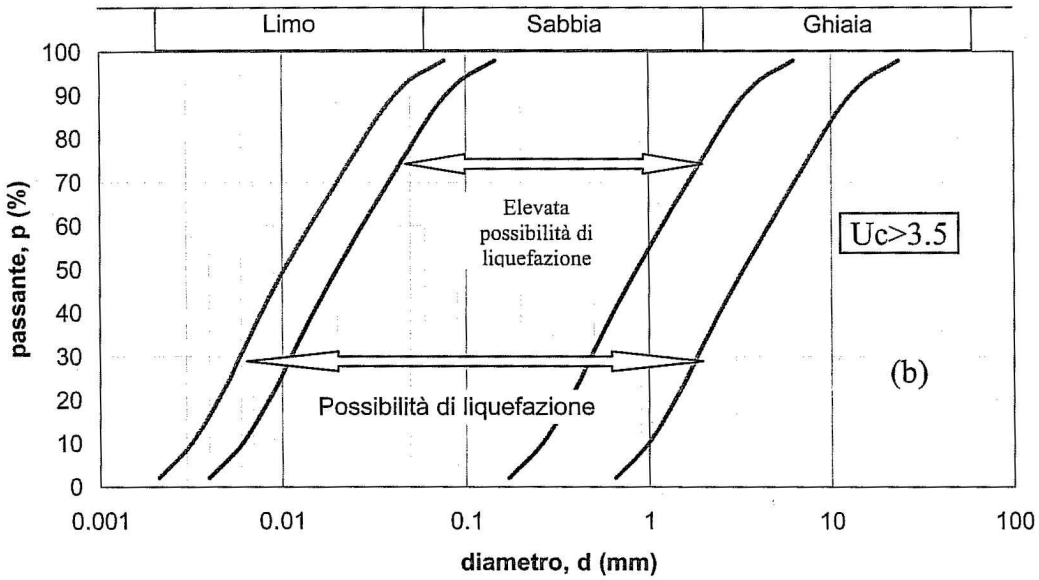
Valori normalizzati per $\sigma'_v = 100$ kPa

Criteri granulometrici

Terreni a granulometria uniforme



Terreni a granulometria poco uniforme

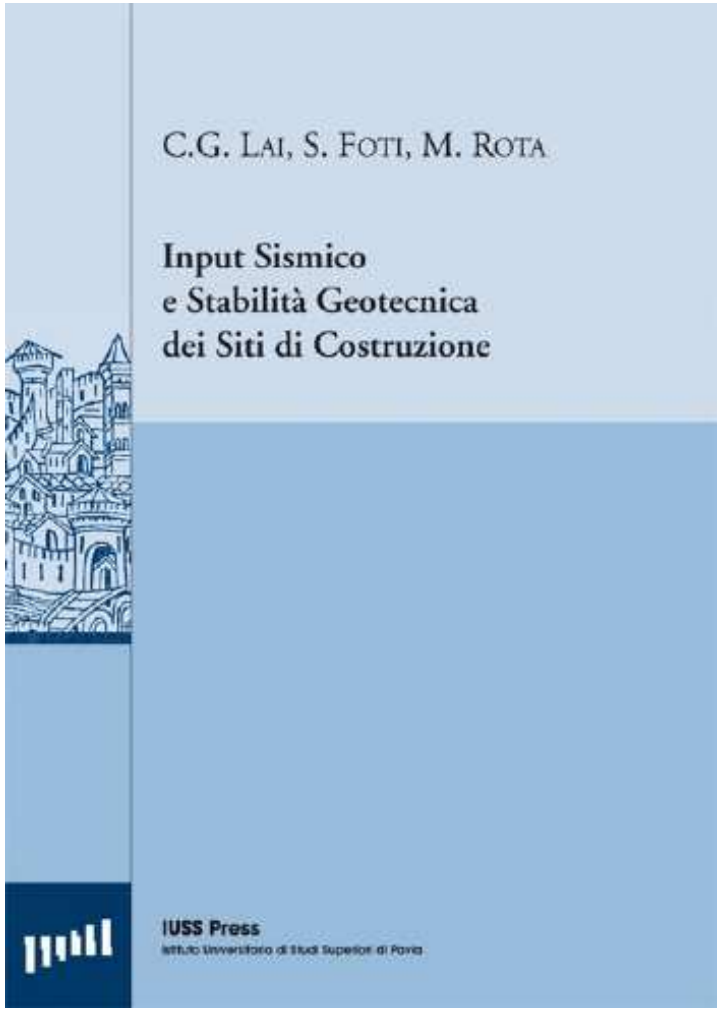


$Uc = d_{60}/d_{10}$

Indagini

- Profilo stratigrafico
- Profondità di falda (con variazioni stagionali)
- Distribuzione granulometrica
- Prove penetrometriche (SPT-CPT)

Per approfondimenti:



POLITECNICO DI TORINO

Grazie per l'attenzione

La presentazione è disponibile su:

www.soilmech.polito.it/download